

文章编号: 0253-2239(2002)12-1442-05

用于多信道色散补偿的 Gires-Tournois 干涉仪的特性分析*

李琳 赵岭 高侃 黄锐 陈高庭 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 从 Gires-Tournois(G-T)干涉仪的特性着手,分析一种基于 G-T 干涉仪的多信道色散补偿方法。该方法利用 G-T 干涉仪色散曲线的周期特性,同时对 $1.55 \mu\text{m}$ 窗口内的多个通信波长进行色散补偿,并实现色散补偿量的动态可调谐。

关键词: G-T 干涉仪; 色度色散; 色散补偿
中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

1 引言

当高速密集波分复用系统的传输速率达 40 Gbit/s 以上时,通信系统的色散补偿就变得非常重要。一般 40 Gbit/s 系统累积色散量要小于 50 ps/nm, 而 160 Gbit/s 系统则要小于 5 ps/nm, 致使系统色散容纳数值减小,系统总色散的微小波动可能引起传输质量的劣化。目前常见的色散补偿方案有光纤光栅、体光学干涉和色散补偿光纤等,其中光纤光栅被认为是一种有潜力的色散补偿元件,相关的文章在期刊上发表很多^[1,2]。但是光纤光栅是窄带型滤波器,为了扩宽阻带带宽实现多信道补偿,必须使用长度达 1 m 以上的超长光纤光栅,它的制备工艺复杂,在紫外光写入过程中容易出现缝合误差。体光学干涉色散补偿元件的可使用带宽很广,能覆盖多个信道,而且色散补偿量也较大,不失为多信道补偿的较好选择。目前唯一实现商用化的色散补偿器件是采用体光学干涉方法制备的,主体元件是法布里-珀罗干涉腔^[3,4]。本文分析一种基于体光学干涉的色散补偿方法,核心元件为 G-T 干涉仪。G-T 干涉仪最先是作为一种分波器件而应用到光通信领域的,主要是利用其良好的角度色散特性进行波长分离,此外还可以用于组建波长复用器和光梳状滤波器^[5,6],也可以用于光纤通信系统中的色散补偿^[7,8]。通过分析认为 G-T 干涉仪的多信道滤波和色散特性可以用于多信道色散补偿,并且具有结构简单和色散量动态可调谐等优势。

2 G-T 干涉仪的特性

G-T 干涉仪的谐振腔是由两个平行反射镜构成,前一片是低反镜,后一片是高反镜,镜片之间是无色散介质,介质折射率小于周边反射镜的折射率。基本的工作示意图如图 1 所示,光信号通过准直器变为平行光,以角度 θ 入射,经过 G-T 干涉仪后反射,反射光由透镜聚焦后进入准直器。

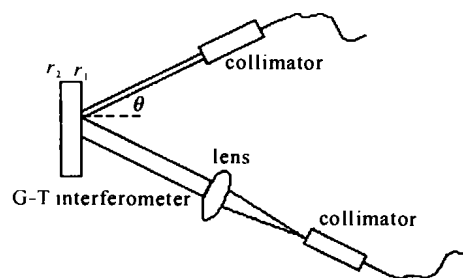


Fig. 1 Scheme of G-T interferometer

当一束光以 θ 角入射,经多束光干涉后,反射光场的反射率为

$$r_{GT} = \frac{r_1 + r_2 \exp[j2knd \cos(\theta)]}{1 + r_1 r_2 \exp[j2knd \cos(\theta)]}, \quad (1)$$

式中 r_1, r_2 分别为低反镜和高反镜的反射率, $k = 1/\lambda$ 为真空中光波传播波数, n 为 G-T 干涉仪谐振腔的折射率, d 为 G-T 干涉仪的谐振腔长。为了减小透过损耗,可以设定 $r_1 = r, r_2 = 100\%$, 那么反射率可以化简为^[3]

$$r_{GT} = \frac{r + \exp[j2knd \cos(\theta)]}{1 + r \exp[j2knd \cos(\theta)]} = \exp(i\theta), \quad (2)$$

其中

* 中科光电集团资助课题。

E-mail: lilingkate@sina.com

收稿日期: 2001-10-30; 收到修改稿日期: 2002-02-26

$$\left. \begin{aligned} \Theta(\lambda, \theta) &= -2\text{arctg}\left[\frac{1-r}{1+r}\text{tg}(\Delta)\right], \\ \Delta &= knd\cos(\theta), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(2)式反映了 G-T 干涉仪反射谱的响应特性,由于复反射率的模数为 1,入射光场会无损耗反射回来,但是相位会发生改变,即 G-T 干涉仪可看成是相位延迟器。

2.1 相位特性

G-T 干涉仪的相位响应谱呈现周期性分布,周期由单程差 Δ 决定。当单程差 Δ 接近 $(m+1/2)\pi$ 的时候,相位 Θ 趋向负的极大值;当单程差 Δ 接近 $(m-1/2)\pi$ 的时候,相位 Θ 趋向正的极大值。由(3)式推出重复周期为

$$\delta\lambda = \lambda^2/[2nd\cos(\theta)].$$

在单个重复周期中,相位响应曲线的线性度与反射率 r 相关,反射率 r 取值越小相位响应曲线更趋向线型递增函数,极限情况下 $r \ll 1$,相位函数简化为

$$\Theta(\lambda, \theta) \approx -2knd\cos(\theta),$$

相位与频率成正比。

2.2 色散特性

从 G-T 干涉仪的相位特性,可以推出 G-T 干涉仪的色散特性。不同的光经过 G-T 干涉仪后,群时延数值不同,具体表达式为

$$\tau = \frac{\partial\Theta}{\partial\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{\partial\Theta}{\partial\lambda} = \frac{\lambda\Delta}{2\pi c} \frac{-2(1-r^2)}{1+r^2-2r\cos(2\Delta)}, \quad (4)$$

由上式推出 G-T 干涉仪的色散数值为

$$D = \frac{\partial\tau}{\partial\lambda} = \frac{\Delta^2}{2\pi c} \frac{8r(1-r^2)\sin(2\Delta)}{[1+r^2-2r\cos(2\Delta)]^2}, \quad (5)$$

色散也具有周期结构,图 2 给出典型的 $d = 1.5 \text{ mm}, r = 0.1$ 时 G-T 干涉仪的色散曲线图。

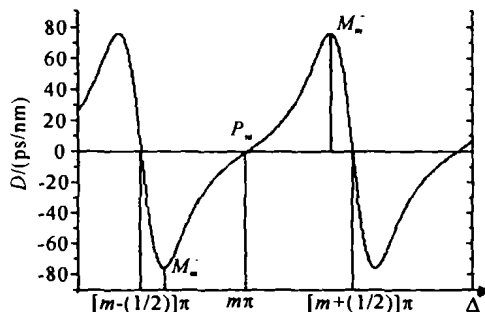


Fig. 2 Dispersion curve of G-T interferometer

在 G-T 干涉仪的色散曲线图上存在两种特殊点:零值点和极值点,分别用 P_m 和 M_m 表示。分析(5)式计算各个特殊点和相应 Δ 数值,列表于下(详见附录 a):

Table 1. Special points of G-T interferometer and their dispersion values

particular point	value of Δ
$P_{m+1/2}$	$(m+1/2)\pi$
P_m	$m\pi$
$P_{m-1/2}$	$(m-1/2)\pi$
M_m^+	$m\pi + \arccos\left[\sqrt{\left(\frac{r^2+1}{4r}\right)^2 + 2} - \left(\frac{r^2+1}{4r}\right)\right]$
M_m^-	$m\pi - \arccos\left[\sqrt{\left(\frac{r^2+1}{4r}\right)^2 + 2} - \left(\frac{r^2+1}{4r}\right)\right]$

极值点处色散数值绝对值为

$$|D_m| = \frac{\Delta^2}{2\pi c} \frac{[3(1+r^2) + \sqrt{(1+r^2)^2 + 32r^2}]^2 \sqrt{16r^2 - [\sqrt{(r^2+1)^2 + 32r^2} - (r^2+1)]^2}}{8(1-r^2)^3}, \quad (6)$$

因为在 $1.55 \mu\text{m}$ 窗口内通常单程差 Δ 的设计值会使 m 取值在 1000 左右,所以在几十纳米的范围内单程差 Δ 可以近似认为不变,从而色散数值的极大值与反射镜的反射率 r 密切相关,图 3 给出色散数值极大值随反射率变化的分布图。

2.3 色散斜率的特性

在每个重复周期中,色散曲线都有一个上升沿和一个下降沿(如图 2),上升沿区间窄较为陡峭,下降沿区间宽相对平缓。可以利用下降沿较平缓部分进行常规光纤的色散补偿,这也就要求 G-T 干涉仪的色散斜率曲线比较平坦。从(5)式可以推出 G-T 干涉仪的色散斜率函数:

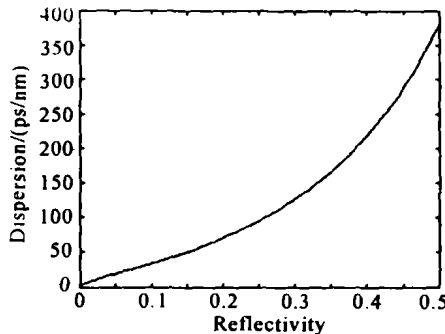


Fig. 3 Maximum value of dispersion vs. reflectivity of the partial reflector

$$D' = \frac{\partial D}{\partial \lambda} = -\frac{\Delta}{\lambda} \left[\frac{2}{\Delta} + 2\arctan(2\Delta) - \frac{8r\sin(2\Delta)}{1+r-2r\cos(2\Delta)} \right] D. \quad (7)$$

图 4 给出反射镜反射率在 10% 和 30% 时 G-T 干涉仪的色散曲线和对应的色散斜率曲线。对比这两条曲线可以发现:在下降沿平缓区域,反射率 r 取值较大时,色散曲线线性度较差,色散斜率数值较大;同样,反射率 r 取值较低时,色散曲线线性度相对较好,色散斜率数值较小。

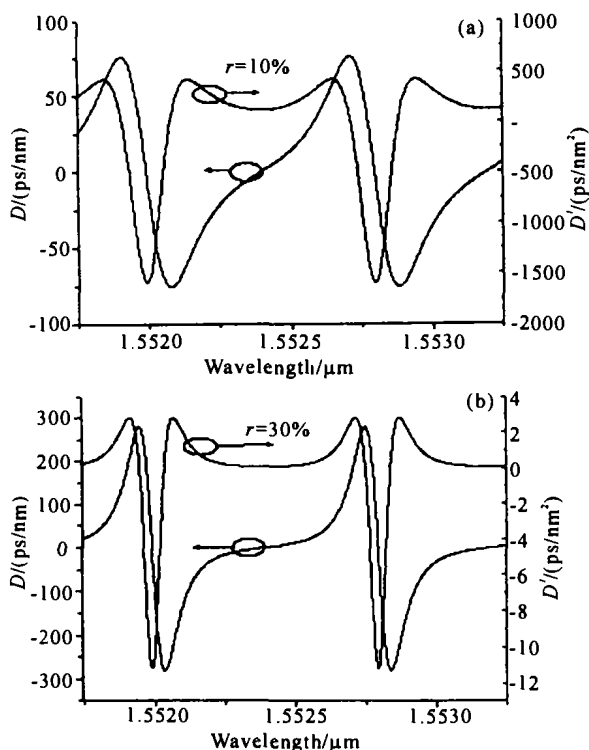


Fig. 4 Dispersion slope of G-T interferometer. (a) $r=10\%$; (b) $r=30\%$

可以近似计算极值点附近区域的色散斜率值(详见附录 b),极值点 $P_{m+1/2}$ 处色散斜率值为

$$D'_{m+1/2} \approx -\frac{\Delta^3}{2\pi c \lambda} \frac{8r(1-r)}{(1+r)^3},$$

极值点 P_m 处色散斜率值为

$$D'_m \approx \frac{\Delta^3}{2\pi c \lambda} \frac{8r(1+r)}{(1-r)^3},$$

为了减小下降沿区域的色散斜率数值,应尽量使反射率 r 的取值较小,这样色散曲线在下降沿区域呈近似线性分布。

对单一波长,在不同反射率条件下色散斜率会发生变化。经计算如图 5 所示,发现对单一波长色散斜率会在某一反射率 r_{zero} 下取值为零。在 $1.55 \mu\text{m}$ 窗口中, r_{zero} 这一特殊值在 20% 附近。这种情况是将单一波长与色散曲线极值点对准,色散数值取为极大值。

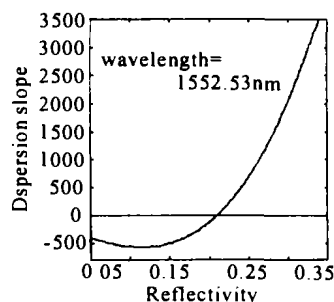


Fig. 5 Variation of dispersion slope according to reflectivity at one ITU-T wavelength 1552.52 nm

3 G-T 干涉仪的多信道色散补偿原理

从上面 G-T 干涉仪色散特性分析中,发现 G-T 干涉仪色散曲线具有良好的周期性,而且在下降沿区域色散数值近似线性分布,可以将这一特性用于多信道色散补偿,并且色散补偿量可进行调谐。

通常用于 10 Gbit/s 系统的多信道色散补偿器件需要具备以下几点: 1) 信道间隔符合国际电信协会(ITU-T)的通讯标准,如常见的 100 GHz(约 0.8 nm); 2) 单个工作波长符合国际电信协会的通讯标准; 3) 色散补偿量较大。由前一小节分析可知,G-T 干涉仪在反射率取值为 10% 左右色散曲线线性度较好,可以进行多信道色散补偿。

根据国际电信协会的通讯标准,工作波长的频率必须满足 $\omega_K = \omega_0 - K\alpha$, 式中 K 为常量, α 为标准波长频率间隔。这种色散补偿器件的信道间隔 $\delta\omega$ 主要由 G-T 干涉仪的腔体参量确定,由 $\Delta = 2\pi\omega nd \cos\alpha/c$ 可得

$$\alpha = \delta\omega = \frac{c}{nd \cos\theta}. \quad (8)$$

那么与中心频率 ω_0 波长相差 α 整数倍间隔的信道色散数值表示如下:

$$D_K = \frac{\Delta_K^2}{2\pi c} \frac{8r(1-r^2)\sin(2\Delta_K)}{[1+r^2-2r\cos(2\Delta_K)]^2} = \left(1 - \frac{2\pi K}{\Delta_0}\right)^2 D_0. \quad (9)$$

但是随着工作波长远离设定的中心波长,单程差 Δ 的影响不容忽视。由于 Δ_0 数值较大,相邻工作波长的色散偏离近似为

$$\delta D_K = D_K - D_0 = -\frac{2\pi K}{\Delta_0} D_0, \quad (10)$$

(10) 式说明工作波长偏离越大,色散数值改变量越

多。例如在 $1.55 \mu\text{m}$ 工作波段, 选取 λ_0 为 1552.52 nm , 波长间隔 $\delta\lambda = 0.8 \text{ nm}$, $r = 0.1$, 那么 G-T 干涉仪在中心波长的色散数值为 -17.81 ps/nm 。图 6 给出以 1552.52 nm 为中心波长, 波长间隔为 0.8 nm 的 16 个波长的色散数值曲线, 从图中看到色散数值的偏移近似线性分布, 但是与中心波长相差不太大。

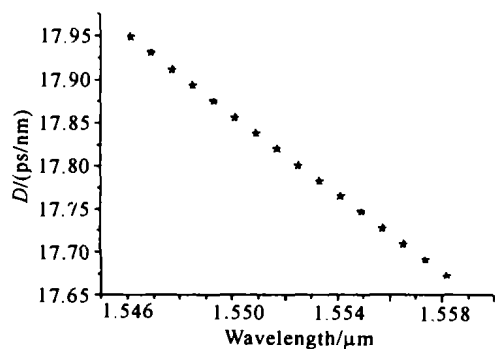


Fig. 6 Dispersion distribution of 16 ITU-T channels in C-band

在满足等信道间隔要求前提下, 腔长 d 和入射光角度 θ 都可由 (8) 式设计出来。但是由 (10) 式得出, 微调 G-T 干涉仪腔长 d 或者入射光角度 θ 会使得色散曲线发生变化。由 (8) 式可知, 如果微调 G-T 干涉仪腔长 d 的幅度在 1% 以下或者微调入射光角度 θ 在 1° 左右, 对于信道间隔的影响会小到可以忽略不记, 但是中心波长的色散数值会由于光程差的微小变化而会发生改变。如对图 6 所示的 1552.52 nm 波长, 腔长 d 增加 $1 \mu\text{m}$, 色散数值变为 $+20 \text{ ps/nm} \sim 10 \text{ ps/nm}$; 入射角度增加 0.9° , 色散数值变为 $-40 \text{ ps/nm} \sim -60 \text{ ps/nm}$ 。利用这一特性, 可以实现色散补偿的动态可调谐功能。

结论 G-T 干涉仪响应函数的周期特性使其在多信道滤波方面发挥作用。基于 G-T 干涉仪的色散补偿器件能够对多个信道同时进行补偿, 色散补偿量由 G-T 干涉仪的结构参量确定, 在反射率取值较小情况下, 色散曲线线性度较好, 色散斜率较小。在满足国际电讯协会通讯标准的条件下, 相邻信道的色散数值会有较小变化, 但是相对幅度不大, 可以保证各处信道的色散补偿量波动不大。微调 G-T 干涉仪的腔长和入射光角度时, 可以改变色散补偿量的大小, 符合下一代光通信器件需要动态补偿的要求。但是这种方法存在一些不足, 例如与其他方法相比色散补偿量显得较小, 色散补偿量的微调机构对于精度的要求较高等等, 这些问题有待于做进一步的改进和完善。

参 考 文 献

- [1] Eggleton B J, Rogers J A, Westbrook P S *et al.*. Electrically tunable power efficient dispersion compensating fiber Bragg grating. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(7):854~856
- [2] Rogers J A, Eggleton B J, Pedrazzani J R *et al.*. Distributed on-fiber thin film heaters for Bragg grating with adjustable chirp. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(21):3131~3133
- [3] Shirasaki M. Large angular dispersion by a virtually imaged phased array and its application to a wavelength demultiplexer. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(5):366~368
- [4] Shirasaki M. Chromatic dispersion compensation using virtually-imaged phased array. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(12):1598~1600
- [5] Dingel B B, Izutsu M. Multifunction optical filter with a Michelson-Gires-Tournois interferometer for wavelength-division-multiplexed network system applications. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(4):1099~1101
- [6] Dingel B B, Aruga T. Properties of a novel noncascaded type, easy-to-design, ripple-free optical bandpass filter. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(8):1461~1469
- [7] Madsen C K, Lenz G. A multi-channel dispersion slope compensating optical all-pass filter, *OFC '2000*, WF5
- [8] Jablonski M, Tanaka Y, Yaguchi H *et al.*. Adjustable dispersion-slope compensator using entirely thin-film coupled-cavity allpass filters in a multi-reflection parallel configuration. *OFC '2001*, TuS3

附录 a

色散曲线极值点的推导:

将 (5) 式对波长求导得到

$$\frac{\partial D}{\partial \lambda} = \frac{\Delta}{\lambda} \left[\frac{2}{\Delta} + 2\text{ctg}(2\Delta) - \frac{8r\sin(2\Delta)}{1+r^2-2r\cos(2\Delta)} \right] D, \quad (\text{a1})$$

并求解方程 $\partial D / \partial \lambda = 0$ 。化简上式得到

$$\frac{\sin(2\Delta)}{\Delta} = \cos(2\Delta) - \frac{4r\sin^2(2\Delta)}{1+r^2-2r\cos(2\Delta)}, \quad (\text{a2})$$

一般 Δ 取值远远大于 1, 因而可以将等式左边简化为 0。解方程 (a2) 可得方程的解为

$$\cos(2\Delta) = \sqrt{\left(\frac{r^2+1}{4r}\right)^2 + 2 - \frac{r^2+1}{4r}}. \quad (\text{a3})$$

附录 b

零值点处色散斜率的推导:

设 δ 为微小波动量, 在极值点 $P_{m+1/2}$ 附近 $\Delta = (m+1/2)\pi + \delta$, 相应的色散数值为

$$D = \frac{\Delta^2}{2\pi c} \frac{8r(1-r^2)2\delta}{(1+r^2-2r)^2}, \quad (\text{b1})$$

从而色散斜率为

$$D'_{m+1/2} = \frac{\partial D}{\partial \lambda} \approx -\frac{\Delta^3}{2\pi c \lambda} \frac{8r(1-r)}{(1+r)^3}, \quad (\text{b2})$$

同理可得, 在极值点 P_m 附近 $\Delta = m\pi + \delta$, 色散斜率值为

$$D'_m \approx \frac{\Delta^3}{2\pi c \lambda} \frac{8r(1+r)}{(1-r)^3}. \quad (\text{b3})$$

Characteristics Studies on Gires-Tournois Interferometer Used for Multi-Channel Chromatic Dispersion Compensation

Li Lin Zhao Ling Gao Kan Huang Rui Chen Gaoting Fang Zujie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 30 October 2001; revised 26 February 2002)

Abstract: Based on theoretical analysis of the properties of Gires-Tournois (G - T) interferometer, a multi-channel chromatic dispersion compensation method using this interferometer is analyzed. This method takes advantage of periodic-like function of dispersion to produce large amount of negative dispersion to simultaneously compensate several channels' positive dispersion in 1.55 μm window. And it can execute tunable chromatic dispersion compensation by slightly varying incident angle of the light or changing the length of G - T resonant.

Key words: G - T interferometer; chromatic dispersion; dispersion compensation

全国第 11 次光纤通信暨第 12 届集成光学学术会议征文通知

本次会议由中国通信学会光通信委员会、中国电子学会通信学分会、中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会联合主办,南京邮电学院、南京富士通通信设备有限公司等单位承办。

本次会议将于 2003 年秋季在南京举行,欢迎全国各高等院校、科研部门的科技人员投稿,展示最新研究成果;欢迎规划、设计、建设、运行维护部门的工程技术人员投稿,交流实际工作中的宝贵经验和心得;欢迎有关企业、部门到会介绍新产品。

一 会议征文范围

1. 网络与系统技术;
2. 光纤与光缆;
3. 光有源器件与光电集成;
4. 光无源器件与集成光路;
5. 光纤传感。

二 会议征文只接受电子文档,征文具体范围、要求,请看南京邮电学院校园网:<http://www.njupt.edu.cn/>征文通知。

三 征文截稿日期:2003 年 5 月 31 日。

四 通信地址:江苏南京新模范马路 66 号 邮编:210003

联系人:南京邮电学院光信息技术系 张小英 电话(传真):(025)3492308

南京邮电学院科技处 黄金仙 电话:(025)3492248

全国第 11 次光纤通信暨第 12 届集成光学学术会议筹备组

2002 年 9 月 5 日